

兵庫県南部地震復興工事におけるGPSの利用

重松 文治 守屋 典昭
佐野 泰三

要 旨

GPS（汎地球測位システム）測量は光波や電波方式のように測点間の見通しの必要がなく、かつ相対測位方式の場合基準局から10～15kmの広範囲において高精度の測量が可能なることから、兵庫県南部地震後の被害調査や復興工事に大いに利用されその有効性を示した。

当社は震災直後の早期時点からGPSによる調査に参画し、被害調査や復興計画のための測量業務等を行い震災対応への貢献の一助となることができた。

現地では運輸省が震災調査のため設置したRTK（リアルタイム・キネマティック）方式の基準局を利用して、大規模なSTA（スタティック）方式による基準測量との精度比較や、従来の直接水準測量との高さ精度比較等を実施し、貴重なデータを得ることができた。

1. まえがき

平成7年1月17日早朝に阪神・淡路地域で発生した兵庫県南部地震では、港湾施設をはじめとする土木施設に従来の地震被害とは比較にならないほどの大きな被害が生じた。

その被害地域は大阪から淡路島にまでおよび、災害からの復興事業にあたっては、この広範囲の被害状況の調査が必要であった。

しかし、阪神・淡路地域は全体が地震の影響で動いているために、基準となる三角点や水準点がない。

GPSは、衛星からの電波を使用しているためにこのような測量には適しているであろうという判断が多くの関係者にあったが、GPSは単独測位方式では数十mの誤差があり、測量に利用される相対測位方式と言われるものは、10～20km以内に正確な基準点を必要とする。

GPSによる測量を行うためには、地震の影響を受けていない遠くの三角点を基準として10km～20kmのトラバースを組みながら神戸地区まで基準点を導かなければならないが、そのような測量は国土院でなければ行えない。

このような状況の中、今回GPSを用いた理由は、従来方式に比較して一度に長距離が測れ、途中の障害物の影響を受けない等の特徴があるためである。

そのために当初は絶対位置はある程度無視して相対位置の測量で被害状況の調査を行った。これは後で、使用した基準点の座標を測り直せば計算により今回測量した結果の補正が可能であるからである。

GPS測量には、長時間かけて測るSTA方式と瞬時に測れるRTK方式があり、それぞれに長所・短所があるため目的に応じて使い分けた。

特に、陸上におけるRTK方式の本格的な運用は今回が初めてであり、STA方式とRTK方式の使い分けは最も苦慮したところである。

本報はGPS測量がどのようにして行われたかについて報告する。

2. GPSの概要

GPS測量は、人工衛星からの電波を利用して、地球上の位置を幾何学的に測位する方式である。

当初、GPS受信機1台のみによる単独測位であったがこの方式の場合には、表-1に示すような誤差を含んでいるために、一般に、カーナビゲーションやレジャーボート用のように精度が数十mでよいものに利用されている。

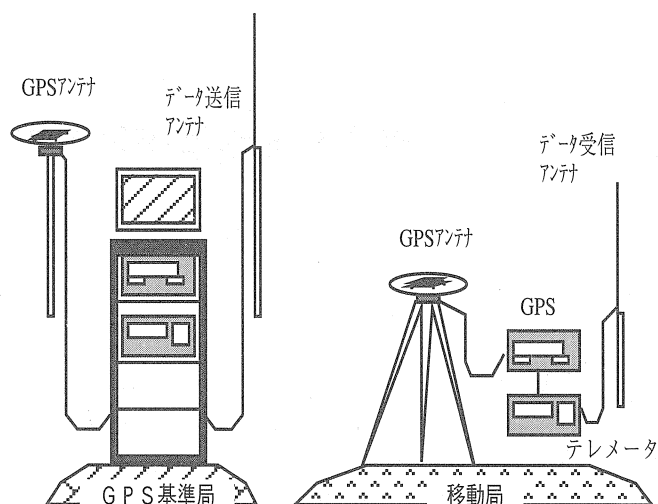
この誤差を補正する方法として、STA方式やRTK方式等の干渉測位方式が開発されて高精度になったため、測量分野への導入が進められてきた。

この方式では、図-1に示すように衛星からの信号を基準局と移動局の2点で同時に受信し、搬送波の位相データを処理して、位相データを基準局から移動局に送信することにより移動局の位置を高精度に求めることができる。

特にRTK方式はリアルタイムで測量が可能なることから、その優れた特徴を活かして今後の港湾工事における

表一 1 GPSの誤差要因

誤差源	誤差
衛星時計誤差	1 ~ 3 m
衛星軌道誤差	1 ~ 5 m
電離層の影響	2 ~ 10 m
対流圏の影響	0.4 ~ 2 m
受信機の雑音	0.5 m
マルチパス(電波多重反射)	0.5 ~ 1 m
SA (米国の精度コントロール)	30 m



図一 1 RTK/GPSのシステム構成

測量方式として期待されている。

表一 2 にGPS方式とその他の測量機器の比較を示すが、GPSは計測範囲の距離がSTA方式で20~30km、RTK方式で10~15kmと一度に遠距離を測れ、しかも、天候の影響を受けずX、Y、Zが同時に計測できる等多くの特長がある。

GPSが開発される以前には、光波測距儀が用いられている。方式によりトータルステーションや、自動追尾などがあるが、視認が必要であるため気象条件の影響を受ける上、一度に数km程度しか計測できない。

電子レベルは、水準測量を行う場合に最も高精度な測量機器であるが、一度に測れる距離が100m程度の上、高さしか計測できない。

今後は、GPS測量が中心になると思われるが、従来測量の全てが本方式に変わるわけではなく、近距離を高精度で測る場合や、GPS衛星からの電波が受信できないビル谷間や山岳測量には従来の方式が優れている。

表一 2 GPSとその他の測量機器の比較表

項目 機器	精度	計測範囲	装置構成	気象条件 雨霧雪	処理方法	計測時間
GPS (STA)	X,Y $\pm 5\text{mm} + 1\text{ppm} \times D$ Z $\pm 10\text{mm} + 1\text{ppm} \times D$	20 ~ 30 km	基本構成 既知点×1以上 新点×1以上	影響なし	後処理 (網平均処理)	標準 2時間 高速 15分
GPS (RTK)	X,Y $\pm 10\text{mm} + 2\text{ppm} \times D$ Z $\pm 20\text{mm} + 2\text{ppm} \times D$	10 ~ 15 km	同上	同上	リアル タイム	瞬時
光波測距儀	X,Y,Z $\pm 5\text{mm} + 5\text{ppm} \times D$ 測角精度 $\pm 3''$	2 ~ 4 km	本体とミラー	影響あり	同上	同上
電子レベル	Z 水平精度 $\pm 10''$	100 ~ 200 m	本体と受光部	同上	同上	同上

3. STA方式による測量

今回の測量は、まずSTA方式による測定を行った。

GPSを用いた測量は数km以内に正確な基準局が必要のため、地震後ただちに運輸省第三港湾建設局が計測した結果を入手し、現場を見ながら上空の視通(仰角15度以上)を確保し、設置が容易でかつ安定している場所として六甲アイランドの点と二工区の点二箇所にGPS基地局を設置して、STA方式により各被害状況を測定した。

その理由は以下の通りである。

①RTK方式は、以前のGPS導入時の実験でSTA方式よりも精度が劣る結果がでていた。

②RTK方式はテレメータが必要とされ、特定小電力方式では距離が1~2kmの上、間に構造物があると届かない。

③ポートピア基準局の15km届くRTKシステムの補正データは、当初1カ月間、我が社に専用の受信機が

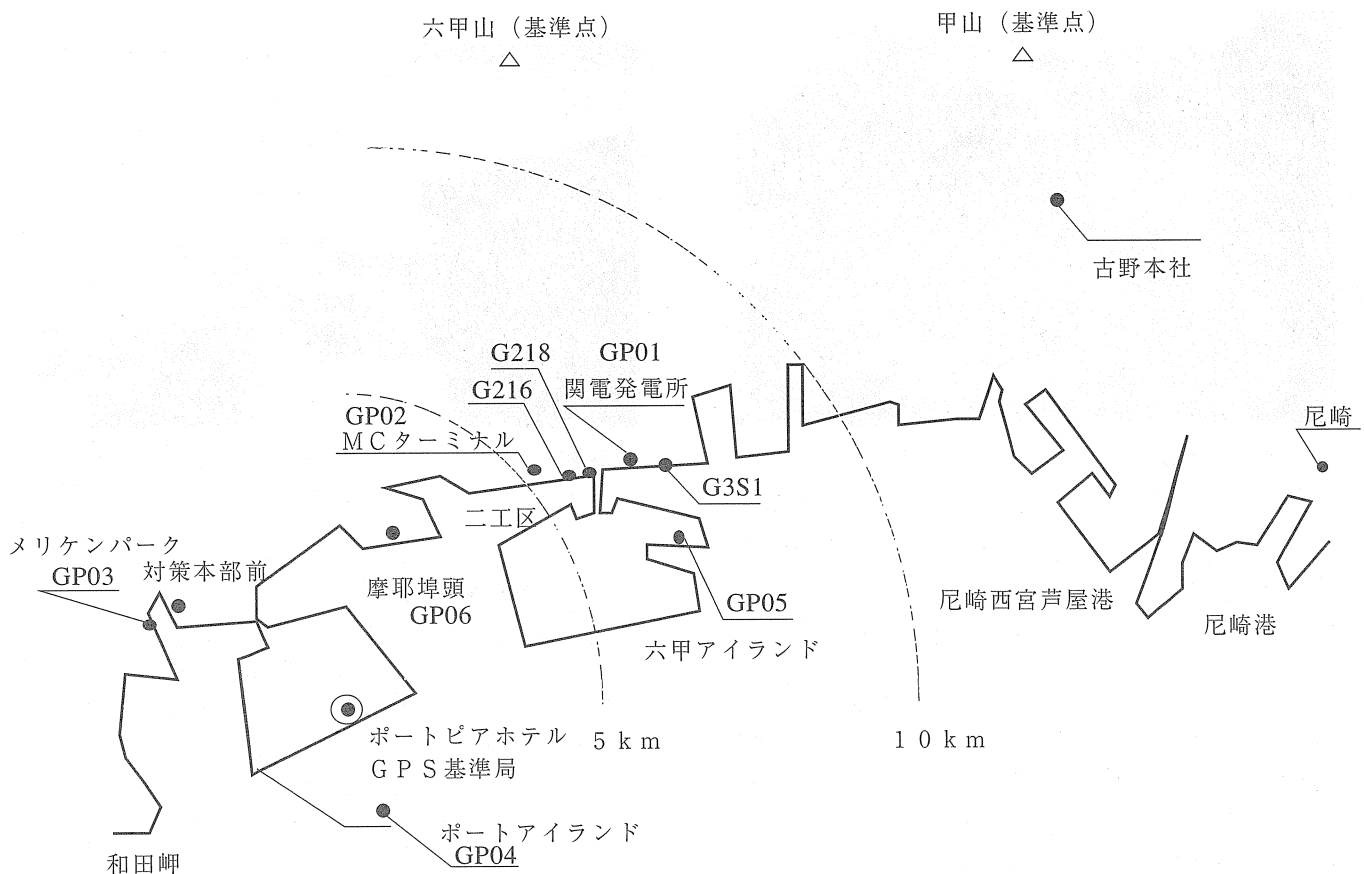


図-2 神戸での測点の位置関係

なかったため使用することができなかった。

④三角点を使用せずに、運輸省第三港湾建設局の測った仮基準点の六甲アイランドの点を我々の基準としたのは、運輸省第三港湾建設局が基準としている三角点を含め阪神地区近傍の三角点の変動していると予想されたため、運輸省と共通の座標としたほうが後で補正が容易で

あると判断したためである。

これらの測量結果は、トータルステーション等の結果と組み合わせられて被害調査に役立った。

その後、国土地理院により、六甲山と甲山の三角点の正確な座標値が判明したために、それぞれを既知点とし、新点として関電、MCターミナル、メリケンパー

表-3 神戸基準点測量結果 (高さC.D.L.:神戸港基準水準面)

No	点名	点種別	日本測地系			平面直角座標系(5系)			
			緯度	経度	高さ	X	Y	Z	
1	基準点	甲山	二等三角点	34 46 18.098	135 19 56.446	309.13	-135795.00	91432.21	309.13
2	基準点	六甲山	一等三角点	34 46 29.1528	135 15 59.5143	931.02	-135512.34	85405.35	931.02
3		尼崎		34 40 55.4103	135 22 36.7618	27.054	-145695.878	95611.233	27.054
4		古野本社		34 40 16.0295	135 21 26.0330	42.456	-139533.132	93748.179	42.456
5	RTK基準局	ポートピアホテル		34 39 42.3465	135 12 59.1018	117.581	-148087.653	80928.820	117.581
6	新点(GP01)	関電発電所		34 41 57.2499	135 16 28.0108	2.795	-143883.079	86208.229	2.795
7	新点(GP02)	MCターミナル		34 42 00.9160	135 15 40.0663	2.63	-143781.453	84987.197	2.63
8	新点(GP03)	メリケンパーク		34 40 42.6530	135 11 28.1239	3.629	-146249.620	78596.953	3.629
9	新点(GP04)	運輸省三建		34 39 20.6831	135 13 36.1506	3.81	-148746.787	81877.990	3.81
10	新点(GP05)	六甲アイランド		34 41 22.0457	135 17 11.2482	3.223	-144957.382	87318.715	3.223
11	新点(GP06)	摩耶埠頭		34 41 33.8659	135 13 45.8645	2.312	-144641.206	82088.695	2.312



写真-1 二等三角点 甲山

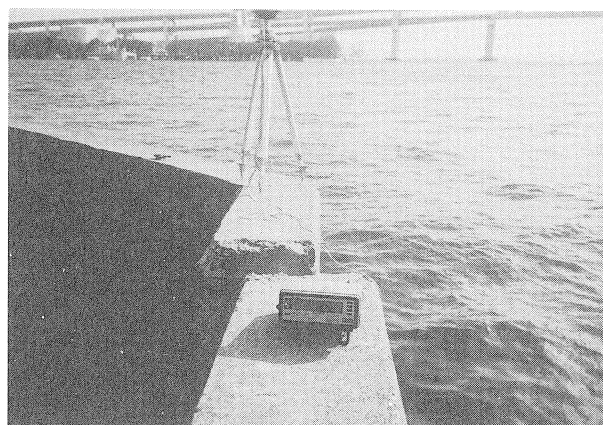


写真-2 GPSによる護岸の被害状況の調査

ク、ポートアイランド、六甲アイランド、摩耶埠頭等の測量をSTA方式により行った。

図-2に測点の位置関係と表-3にその測量結果を示す。

この時は、精度を上げるためGPS10台を各測点へ設置し、2時間以上の同時計測を行った。これは各測点を同時に測量することによりGPS受信機の据え変え誤差をなくし、同一条件で共通の衛星を使用することにより高精度な測量が行えるためである。

写真-1に二等三角点である甲山での基準点測量の状況と、写真-2にGPSによる護岸の被害状況の調査状況を示す。

4. RTK方式の精度検証

4.1 検証方法

RTK方式は、リアルタイムで測量ができるが精度はSTA方式より劣るため、陸上の測量には適していないと言われていた。また、遠距離における精度の確認は、比較となる基準点や水準点と長距離の通信が可能なテレメータシステムが必要なため、いくつかの陸上分野の使用例はあったが簡易的な測量を行っているにすぎなかった。

STA方式は国土地理院で導入されており実績もあるので、今回STA方式で行った神戸基準点測量結果を真値として、ポートアイランドに設置された、RTKの基準局を利用して、STA方式との精度比較を行った。このような長距離におけるSTA方式とRTK方式の精度の比較は、今回が初めてである。

STA方式で計測した各新点に、RTK受信機をセットして1時間の連続計測を行いデータを収録した。

その代表的な例として基準局から基線長で2.7 kmの当社復興対策本部前（以下本部前とする）と7.1 kmの六甲アイランドと15.4 kmの古野本社の時系列データを図-3（X）、図-4（Z）に示す。

4.2 絶対値精度の比較

表-4にSTA方式とRTK方式の測量結果を示す。

X, Yの差は基準局から7.1 kmの六甲アイランドの位置で約2センチ、15.4 kmの古野本社においても、数ミリの誤差内に収まっている。

このことから、RTK方式においてもSTA方式と同じように時間をかけて平均化すれば精度が向上することがわかった。

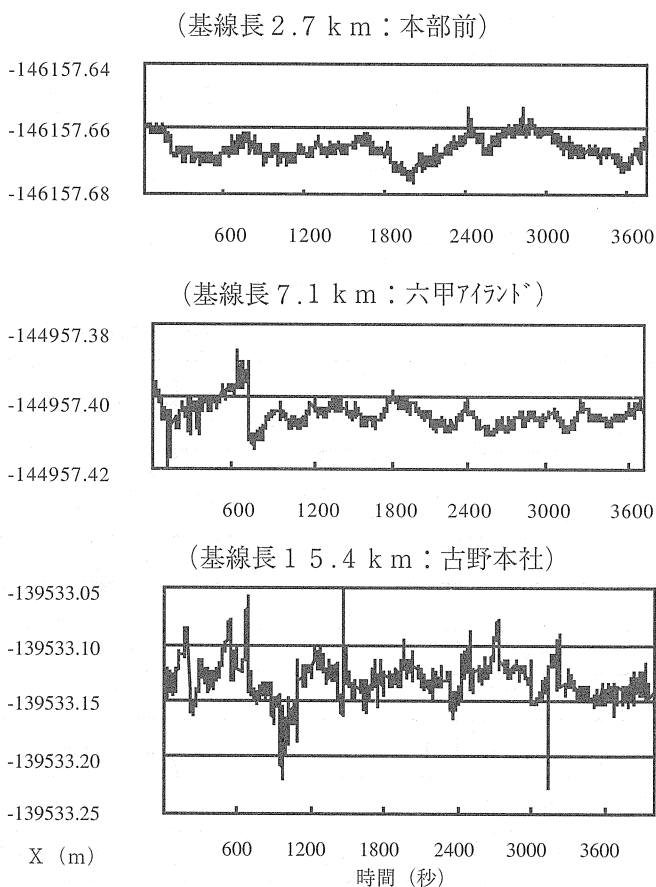
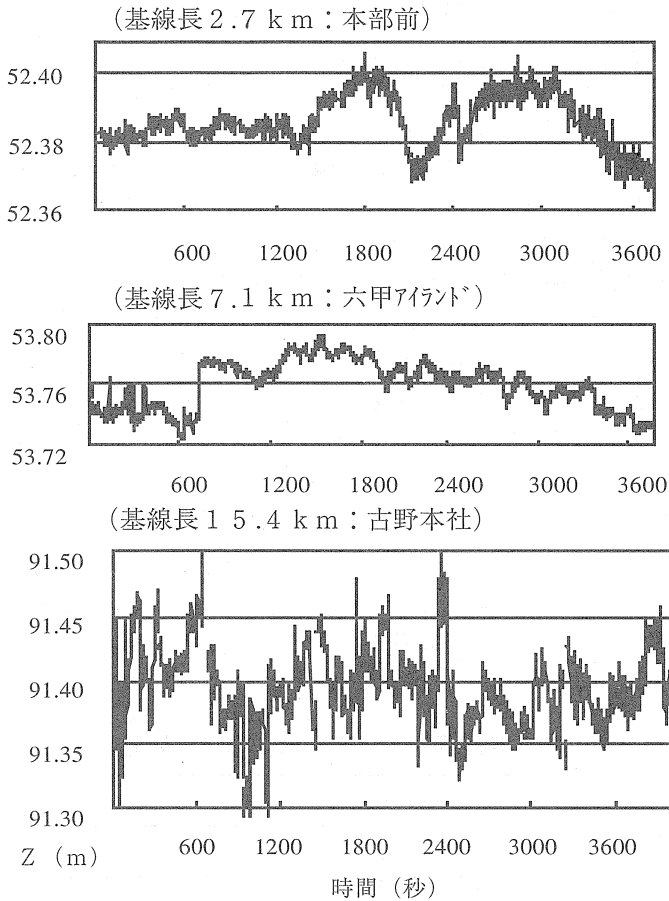


図-3 RTK方式の各点におけるXの連続データ



図一四 RTK方式の各点におけるZの連続データ

しかし、Zの高さは、六甲アイランドで-50.532 m、古野本社で-48.938 mと大きく異なる。

この原因の一つは、GPSの表示はWGS-84（地球中心を原点とする全世界的な測地座標系）であるが、従来の高さ表示はC.D.L.または、K.P.（神戸港工事零位）やT.P.（東京湾平均海面）で表されることによる。それぞれWGS-84から下記の常数を引くことにより、それぞれに準拠した値となる。

$$(WGS-84) - 48.077 m = C.D.L.表示$$

$$C.D.L.表示 - 0.0613 m = K.P.表示$$

$$K.P.表示 - 0.8934 m = T.P.表示$$

また、アンテナ高さの補正も行う。

しかし、これらを考慮し仮にT.P.表示とした場合においてもその差は

$$(WGS-84) - 49.0317 m = T.P.表示$$

となるが、古野本社の結果は

$-48.938 m - (-49.0317 m) = 0.0937 m$ と大きく異なり、六甲アイランドでは1.5 mと大幅に異なる。これはGPSの誤差や余震の影響ではなく、計測方法に何らかの誤りがあったと考えられるため、高さ方向においてはSTA方式との比較ではなく、別途に直

表一四 STAとRTKの1時間の平均値

場所	測位方式	X (m)	Y (m)	Z (m)
六甲アイランド (GP05)	STA	-144957.382	87318.715	3.223
	RTK	-144957.405	87318.716	53.755
	STA-RTK	0.023	-0.001	-50.532
古野本社	STA	-139533.132	93748.179	42.456
	RTK	-139533.13	93748.175	91.39
	STA-RTK	-0.002	0.004	-48.934

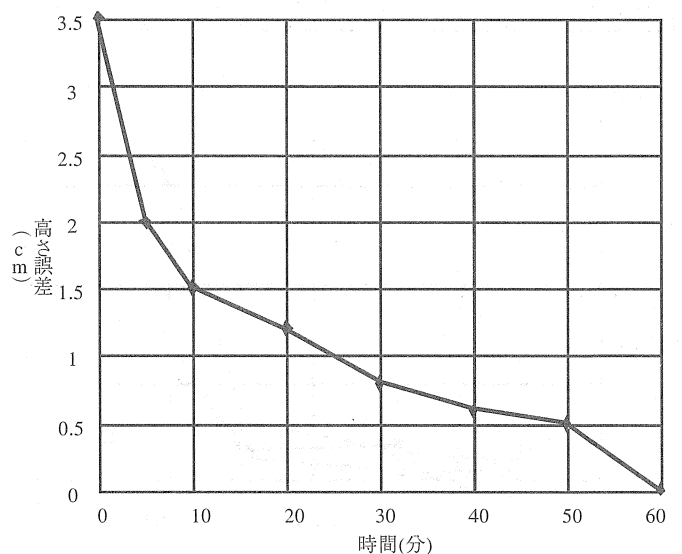
表一五 直接水準測量とRTK方式のZ比較

測点	水準測量 (T.P.)	RTK				水準測量 - RTK
		WGS-84	(C.D.L.)	(K.P.)	(T.P.)	
G216	2.7659	51.802	3.725	3.6637	2.7703	-0.004
G218	3.0331	52.062	3.985	3.9237	3.0303	0.003
G3S1	3.9776	53.007	4.930	4.8687	3.9753	0.002

接水準測量との精度検証を行なった。

表一五に当社の工事エリア内の測点において、測量専門業者が行なった直接水準測量とRTK方式による1時間平均値の比較した結果を示す。

この結果、水準測量との誤差は数ミリと高さ方向においてもRTK方式は高精度であることが確認できた。



図一五 0秒～1時間の平均処理（基線長7 km）

4. 3 RTK方式の精度向上

図-3と、図-4の時系列データを見ると、RTK方式の測量結果は変動していることがわかる。

水平精度X, Yはほとんど同じ傾向を示すためここでは、Xのみの結果を示す。

その変動幅は7.1 kmまでは2~3 cmの範囲に収まっているが、15.4 kmでは15 cm以上と急激に変動幅が増えている。

高さZは7.1 kmでは3~4 cm、15.4 kmでは20 cm以上と急激に変動幅が増えている。

これらの結果より以下のことがわかる。

①7 kmまでは安定しているが、15 kmでは変動幅が大きい。

②X, Yに比較してZの変動幅が約30%大きい。

その周期は瞬時のものや、30分以上の長周期がある。したがって高精度に測量を行いたい場合には1時間以上の連続計測の平均値としなければならない。

図-5に、RTKの平均処理時間と精度の向上の関係

を示した。平均処理時間と精度向上との関係を数カ所の時系列データをもとに、1時間の平均値を求め、5分間、10分間と平均時間を変えて1時間平均との差を求めたものである。

4. 4 RTK方式の標準偏差

RTK方式のように変動しているデータの精度を表す場合には標準偏差が一般的に用いられる。GPSメーカーの仕様書もこの標準偏差で $X, Y \pm 10 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ (D は距離:m)、 $Z \pm 20 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ と記されており、実験結果の基線長2~15 kmにおける標準偏差を表-6と図-6に示すが、12 kmの距離までこの仕様をクリアーしている。

4. 5 RTK方式の変動幅

RTK方式を固定して1時間連続計測しそのデータを見ると細かく変動しているが、移動や動揺している船舶等では、この変動幅がリアルタイムに得られる精度である。

表-6 基線長2~15 kmにおける標準偏差

点名	基準局からの距離	標準偏差		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
本部前	2734.28		0.0045	0.0077
メリケンパーク (GP03)	2969.17	0.0168	0.0101	0.0137
摩耶埠頭 (GP06)	3636.38	0.0279	0.0068	0.0118
MCターミナル (GP02)	5917.24		0.0053	0.0131
六甲アイランド (GP05)	7115.43	0.0186	0.0067	0.0158
古野電気本社	15411.55	0.0770	0.0780	0.1630

表-7 基線長2~15 kmにおける変動幅

点名	基準局からの距離	変動幅		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
本部前	2734.28	0.025	0.020	0.040
メリケンパーク (GP03)	2969.17	0.024	0.021	0.070
摩耶埠頭 (GP06)	3636.38	0.029	0.025	0.057
MCターミナル (GP02)	5917.24	0.034	0.018	0.053
六甲アイランド (GP05)	7115.43	0.028	0.018	0.068
古野電気本社	15411.55	0.145	0.060	0.355

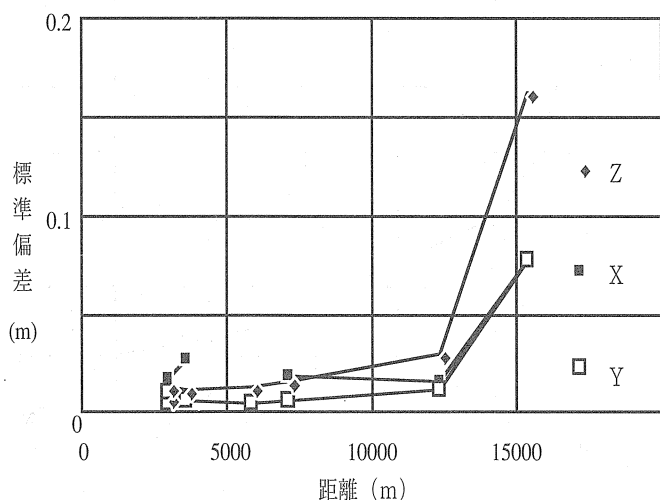


図-6 距離(基線長)と標準偏差の関係

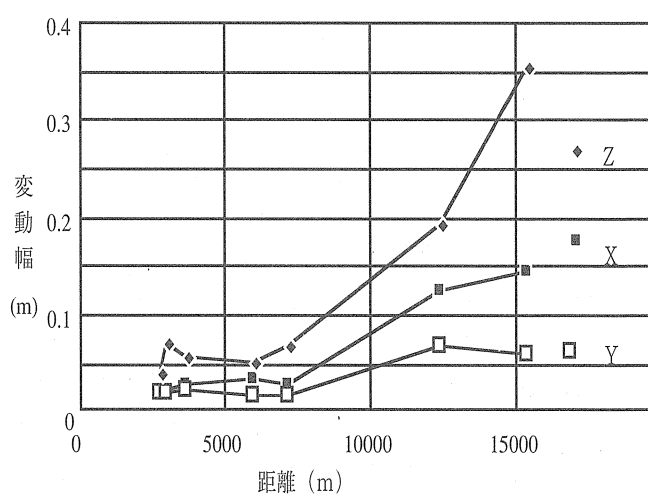


図-7 距離(基線長)と変動幅の関係

これが、RTK方式の本来の使い方、リアルタイム時の測量精度である。

表一七と図一七に基線長2～15kmにおける変動幅を示す。

7.1kmまでは安定しているが、12kmでは急激に変動幅が大きくなっている。

これらの結果からRTK方式は、基線長12kmまでが安定していることがわかる。

しかし、4.2の絶対値精度の比較で述べたように1時間の平均処理を行うことによりRTK方式においても基線長15kmで高精度な結果が得られることがわかっている。この15kmはRTK方式の初期化の限界距離である。

5. GPS測量の留意点

今回の調査を通じ、GPS測量の十分な有効性が確認されたが、さらにその実用性を高め各種工事への適応を図っていく上での留意点を以下に述べる。

5.1 ジオイド補正

従来の測量は水準面に準拠しているために、水平位置は楕円体面、標高はジオイドからの高さという別の系統になっている。

これに対して、GPSを利用する場合は、図一八に示すように、楕円体(WGS-84)に準拠しているため、高さは楕円体表面からのものとなっている。場所によっては、距離1kmにつき、この差が数cm以上に達することがある。したがって、高さを必要とする測量では、水準測量と併用することが必要である。

神戸付近では、ジオイド傾斜は約1cm/kmと予想されるが、GPSの精度が数センチである上、比較となる直接水準点の数も少なく、今回の測量ではジオイド傾斜を明確にすることはできなかった。

5.2 座標変換(WGS-84からローカル座標)

GPSはWGS-84と呼ばれる緯度、経度が出力される。

WGS-84と日本の測定座標系とは楕円体のみならず楕円体中心及び軸の方向が異なっているため、GPSの測定結果をそのまま日本の測地系に取り込むことはできない。取り込むためにはWGS-84から日本の測地系への変換が必要である。使用目的により下記に示す測地系に変換して値を求めることが必要である。

- (1) 日本測地系 (BLH)
- (2) 公共平面直角座標系 (XYH) <1～19系>
- (3) ローカル座標系 (XYH)

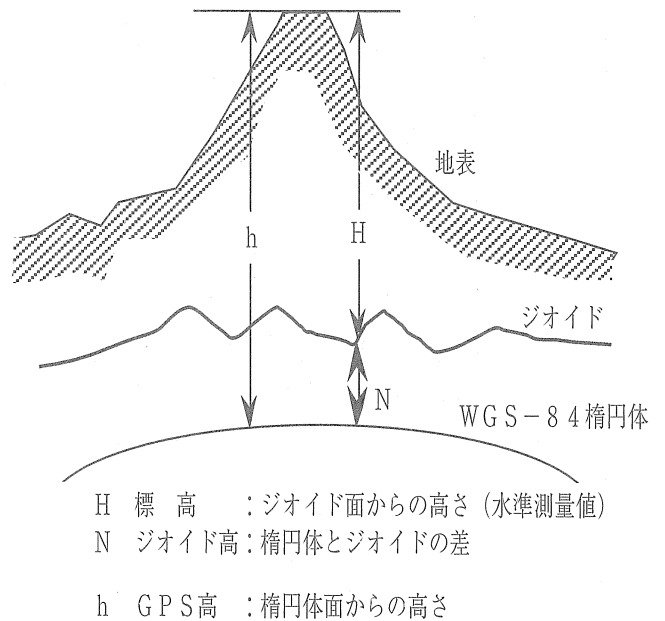
実際の工事測量では、与えられた基準点によるローカル座標による場合が多く、日本測地系または公共平面直角座標系との関連で座標点の移動、座標軸の回転、高度補正等を必要とする。

5.3 障害物とマルチパス対策

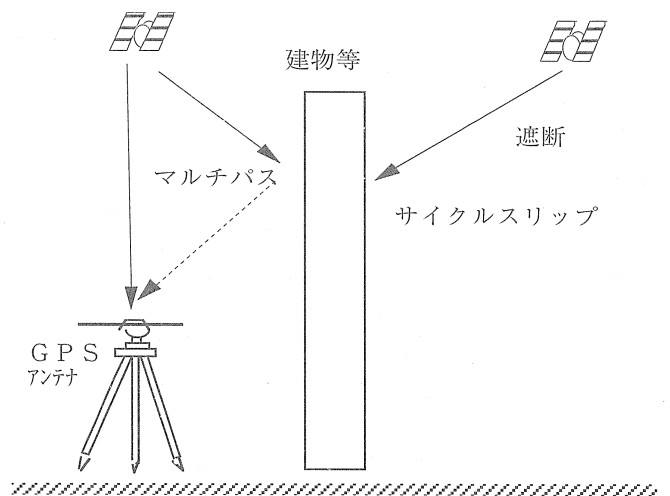
RTK方式は、初期化が終了後電波が一瞬でも遮断すると計測不能となり再初期化を行わなければならない。

図一九のように電波が遮断されることをサイクルスリップという。

また近くの建物等からの反射があると、テレビのゴー



図一八 GPS高とジオイド高の関係



図一九 サイクルスリップとマルチパス

ストと同じように影響を受ける。これはマルチパスといわれ、GPSの場合には精度が大幅に低下するので注意が必要である。

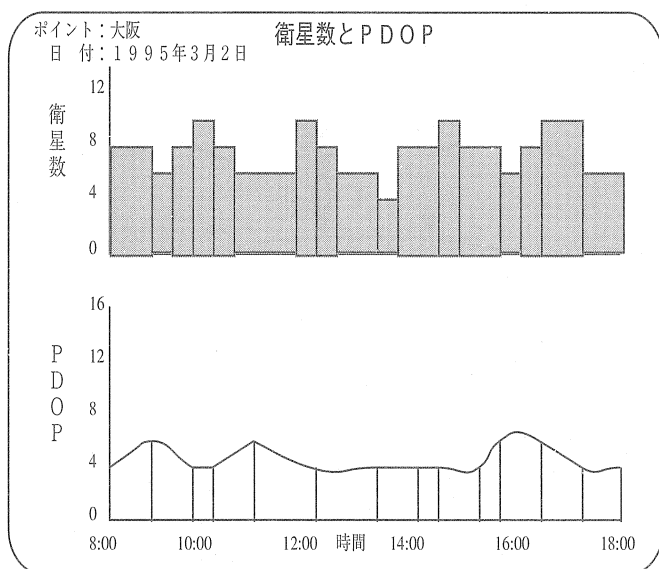
5. 4 運用計画

作業計画は、図一10の衛星予報（受信衛星数、PDOP (Position Dilution of Precision)、衛星配置等）をもとに立案する。

受信衛星数は、測量中は4個以上を同時に補足する必要があり、RTK方式の場合には初期化を行う時には5個以上を同時に補足する必要がある。

PDOPは、衛星の配置などによる位置精度の低下を示しており、PDOP 6以下で測量を行うのが望ましい。

このように作業を行うには衛星の状況を考慮する必要



図一10 衛星数とPDOP

があるので事前に衛星予報を入手し検討する。

衛星情報は、日時・場所を指定すれば2カ月前でも分かるが、古い情報では作業日の内容と異なることもあるので、できるだけ作業予定日に近い情報を基にしなければならない。

6. まとめ

GPSはそれまでは、試験的に使用されているケースがほとんどであったが、今回の震災の被害状況の調査を行う過程でそのGPSの特徴を把握することができ、今後GPSを利用していく上での貴重なデータを得ることが出来た。得られた成果をまとめると以下の通りである。

①今回の精度比較計測の結果、基線長が10km以内

であればRTK方式は、標準偏差で水平X、Yの精度1~2cm、高さHは3cmの精度で測定できることが確認できた。

②RTK方式による高精度な測量結果が必要な場合には長時間(15分~60分)の連続計測を行えば、水平X、Yは1cm、高さHは2cm程度に精度が向上し、STA方式とほとんど差がない。基線長が15kmのRTK方式の限界付近においても1時間の平均値とすれば、STA方式と同程度の精度となる。

③水準測量はジオイド高の問題があるために、単純にGPSそのものの精度で比較することはできないが、近くに水準点があればその点で補正を行うことにより精度を向上させることができる。

④今回は、事前の正確な測量データがないために、被害状況の正確な把握はできなかったが、今後全国にGPS基準局が設置され、常時測量を行えば被害状況の正確な把握が可能である。

謝辞

最後に、運輸省や大阪支店の関係者の皆様には多大なご指導とご協力を頂きました。この紙面をかりて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本測地学会編 新訂版GPS 一人工衛星による精密測位システム：(社)日本測量協会、1989.11
- 2) 重松文治・斎藤勉・小林正典
GPSによる海上測位技術の開発、応用測量論文集 1994.6 Vol.5, pp.19~26
- 3) 重松文治・斎藤勉
GPSを利用した高精度海上測位システムの開発 海洋調査技術 1994年9月 第6巻第2号 pp.53~55
- 4) 重松文治・斎藤勉・小林正典
GPSを利用した高精度海上測位システムの評価と応用 海洋調査技術 1995年3月 第7巻 第1号 pp.9~20